



ULL

Universidad de La Laguna



FACULTAD DE FÍSICA

DEPARTAMENTO DE ASTROFÍSICA

**ESTUDIO DE LA DISTRIBUCIÓN ESPECTRAL
DE ENERGÍA DEL REMANENTE DE
SUPERNOVA IC443 CON DATOS DE QUIJOTE**

TRABAJO DE FIN DE GRADO

Pablo Carro Portos

Supervisado por:

Ricardo T. Génova Santos

10 de septiembre de 2017

Índice general

1. Introducción	9
1.1. CMB y modos de polarización	9
1.2. QUIJOTE	12
1.3. Contaminantes	14
1.4. SNR IC443	16
1.5. Justificación y objetivos	18
2. Análisis de las observaciones	19
2.1. Definiciones: Flujo y Temperatura de brillo	19
2.2. Descripción y formato de los datos	21
2.3. Mapas tomados con QUIJOTE	22
2.4. Método para estimar el flujo	23
2.4.1. Cálculo del flujo en intensidad	24
2.4.2. Cálculo del flujo en polarización	25
2.4.3. Ajuste de la SED a un modelo de dos componentes	25
3. Resultados y discusión	28
3.1. Intensidad de la radiación sincrotrón	28
3.2. Intensidad de la emisión de polvo térmico	30
3.3. Polarización de la radiación sincrotrón	32
3.4. Distribución espectral de energía	33
4. Conclusiones y líneas futuras de investigación	35
4.1. Conclusiones y líneas futuras de investigación	35

Abstract

In this report, we have performed an analysis and characterization of two galactic foregrounds at radio and FIR frequencies, synchrotron radiation and thermal dust emission, in the supernova remnant IC443. In order to do this study, we have used maps in intensity and polarization acquired by the MultiFrequency Instrument from QUIJOTE (Q-U-I JOint TEnerife) experiment and other sources: Haslam, Dwingelloo, Reich, WMAP, Planck and Dirbe.

In the first chapter, we establish a theoretical ground base for this study. First, we introduce the CMB (Cosmic Microwave Background), which is a consequence of the Big Bang, its origin, anisotropies and polarization. After that we present QUIJOTE experiment, an international scientific collaboration placed in the Teide Observatory (Tenerife, Canary Islands). QUIJOTE focuses in the study of B-modes of polarization, its anisotropies and extragalactic and galactic foregrounds such as synchrotron radiation, free-free emission and thermal radiation emission. We will define all kinds of foregrounds, but especially galactic foregrounds, because they are the mechanisms we study in our object. SNR IC443 is a known source of synchrotron radiation in radio frequencies. This object, because it has been widely studied and characterized in literature, has especial interest to QUIJOTE experiment because it can be used to calibrate its instruments. During the second chapter, we define the main concepts we use along this report such as flux density, bright temperature, etc. Later, we explain the different maps we use, and the data we obtain from them. We will dedicate some time to explain the maps from QUIJOTE, the work we did to get the final maps, making a selection of the right maps, and the tools to get them. In the last part, we explain first the method we use to analyze the data in order to get flux densities in intensity and polarization for each foreground. To close this chapter, we explain the two-component fit model we use to represent our results. In the third chapter, we present the results of this study. We will obtain intensity and polarization fluxes by using a technique known as aperture photometry integration on the maps. We will proceed by steps, analyzing the foregrounds separately, starting with the analysis of each component and joining all the results together to finally see the whole picture in a graphical representation of the SED. The proceeding, step by step is: i) We calculate the total intensity of synchrotron radiation. After that, using a fit model to a power law, we determine the spectral index of the synchrotron radiation, that results: $\beta_{sync} = 0.33 \pm 0.12$, we will see that is slightly lower than the typical value of SNRs, this is because we did not include a free-free component in the study. ii) We calculate the total intensity of thermal dust emission. Here, using another fit model we determine the spectral index, $\beta_{dust} = 1.90 \pm 0.48$, the dust temperature, $T_{dust} = 18.70 \pm 1.01 K$ and the optical depth at $250 \mu m$, $\tau_{250} = (8.47 \pm 3.91) \cdot 10^{-5}$, being each of them good approximations to the expected values because free-free emission at these frequencies has very little influence. iii) We calculate

the polarization amplitude of synchrotron radiation, finding the spectral index $\beta_{pol} = 0.36 \pm 0.60$, and using the same fit model we use before to find total intensity of synchrotron radiation. The spectral index is in good agreement with expected values. iv) We made a two-component fit model to the whole range of frequencies by adding the two models used before, and obtaining a good agreement with the expected shape, except in middle range frequencies, where the effect of free-free emission is slightly higher and, in consequence, the curve is lower than the real case.

Finally, in chapter four, we conclude that both, results and models, are adequate for this analysis. We obtain results that are consistent with typical values of this kind of objects excepts in middle frequencies where we can see some differences in the fit model when we compare it with others studies, in conclusion it could be upgraded by using a third foreground at middle frequencies, the free-free emission.

Resumen

En este trabajo se ha realizado el análisis y caracterización de dos de los contaminantes galácticos a frecuencias de radio e infrarrojo lejano, como son la radiación sincrotrón y la emisión de polvo térmico, para el remanente de supernova IC443. Para este estudio se han usado mapas en intensidad y polarización procedentes del Instrumento MultiFrecuencia (MFI, por sus siglas en inglés) del experimento QUIJOTE (Q-U-I JOint TEnerife) y otras fuentes: Haslam, Dwingeloo, Reich, QUIJOTE, WMAP, Planck y Dirbe. En el primer capítulo se establece una base teórica para este estudio. En primer lugar, se introduce el CMB (Cosmic Microwave Background, por sus siglas en inglés), que es una consecuencia del Big Bang, su origen, anisotropías y polarización. Luego se presenta el experimento QUIJOTE, que es una colaboración internacional situada en el observatorio del Teide (Tenerife, Islas Canarias). QUIJOTE se centra en el estudio de los modos B de polarización, sus anisotropías y los contaminantes galácticos y extragalácticos, como son la radiación sincrotrón, la emisión libre-libre y la emisión del polvo térmico. Se definirán todos los tipos de contaminantes, pero nos fijaremos especialmente en los contaminantes galácticos, porque son los mecanismos que se usarán más adelante para estudiar nuestro objeto. El remanente de supernova IC443, es una fuente conocida de radiación sincrotrón en frecuencias de radio. Este objeto es de especial interés para QUIJOTE, debido a que ha sido estudiado y caracterizado ampliamente en la literatura, y puede ser usado para la calibración de sus instrumentos.

En el segundo capítulo, se definen en primer lugar los conceptos principales que serán usados en este trabajo, como densidad de flujo, temperatura de brillo, etc.). Luego se explica el formato de los mapas que serán usados y los datos que se obtienen de ellos. Nos pararemos un poco más en explicar los mapas procedentes de QUIJOTE, el trabajo realizado para obtener los mapas finales, realizando una selección de los mapas correctos y las herramientas para llegar a ellos. En la última parte de este capítulo, se explican los métodos usados para obtener las densidades de flujo en intensidad y polarización para cada contaminante. Para cerrar este capítulo, se explicará el ajuste a un modelo de dos componentes que se usa para representar los resultados finales. En el tercer capítulo se presentan los resultados de este estudio. Se obtendrán los flujos de intensidad y polarización usando una técnica llamada fotometría de apertura sobre los mapas. Se procederá en varios pasos, analizando cada contaminante por separado, empezando con el análisis de cada componente y, posteriormente, uniendo todos los resultados para ver la gráfica completa de la SED. Este procedimiento, paso a paso es: i) Cálculo de la intensidad total de la radiación sincrotrón. Después se determina el índice espectral de la radiación sincrotrón, $\beta_{sync} = 0.33 \pm 0.12$, el cual resulta ligeramente menor que el valor típico de los SNR, lo cual es debido a que no se ha incluido la componente libre-libre en este estudio. ii) Cálculo de la intensidad total de la emisión de polvo térmico. En este caso se usará un modelo distinto para determinar los valores del

índice espectral, $\beta_{dust} = 1.90 \pm 0.48$, la temperatura del polvo térmico, $T_{dust} = 18.70 \pm 1.01 K$, y la profundidad óptica a $250 \mu m$, $\tau_{250} = (8.47 \pm 3.91) \cdot 10^{-5}$, siendo todos ellos buenas aproximaciones a los valores esperados, debido a que la emisión libre ejerce muy poca influencia en estas frecuencias. iii) Calcularemos la amplitud de la polarización de la radiación sincrotrón, hallando un índice espectral de $\beta_{pol} = 0.36 \pm 0.60$, donde se ha utilizado el mismo modelo para el ajuste que para el caso de la radiación sincrotrón. El índice espectral obtenido está de acuerdo con los valores esperados. iv) Se hará un ajuste a un modelo de dos componentes para todo el rango de frecuencias estudiado sumando los dos modelos usados para cada componente por separado, y obteniendo una curva con la forma esperada, salvo para frecuencias intermedias, donde el efecto de la emisión libre-libre es ligeramente mayor y, en consecuencia, la curva es un poco más baja que en el caso real.

Finalmente, en el capítulo cuatro, se concluye que tanto los resultados como los modelos resultan adecuados para este análisis. Los resultados obtenidos son consistentes con los valores típicos de este tipo de objetos, excepto a frecuencias intermedias, donde existe una ligera discrepancia entre nuestro modelo y otros pertenecientes a otros estudios. Se concluye entonces que, aunque adecuado, este estudio puede ser mejorado usando un tercer contaminante a estas frecuencias intermedias, la emisión libre-libre.

Capítulo 1

Introducción

Abstract

This chapter, in order to establish a ground base of this paper, starts with a brief introduction to the CMB (Cosmic Microwave Background), which is a consequence of the Big Bang, that is, the remains of the beginning of the universe. The CMB contains anisotropies, that give rise to the different modes of polarization. QUIJOTE (Q-U-I-Joint Tenerife CMB Experiment) focuses especially in the study of B-modes, its anisotropies, which is a powerful tool to learn about the early stages of the universe, and extragalactic and galactic foregrounds such as synchrotron radiation, free-free emission and thermal radiation emission. The characterization of this foregrounds can be made through the study of supernova remnants like IC443 because they are known sources of synchrotron radiation in radio and X-ray frequencies.

1.1. CMB y modos de polarización

Origen del CMB

El **fondo cósmico de microondas** (Cosmic Microwave Background, CMB en sus siglas en inglés), es una consecuencia del *Big Bang*, es decir, son los restos de una etapa anterior del universo, una época en la que el universo estaba dominado por la radiación, y que ha llegado hasta nuestros días como una débil radiación electromagnética que llena todo el espacio (Gawiser & Silk, 2000). Una de las principales características del CMB es que tiene un espectro de cuerpo negro casi perfecto. Su temperatura hoy en día, 2.726 K (Fixsen, 2009), nos dice que la densidad del número de fotones es del orden de $4 \times 10^8\text{ m}^{-3}$, de los cuales en torno al 90% proceden de la época de recombinación (Lasenby, 2009). Debido a esto,

el estudio del CMB es de gran importancia para la cosmología, porque proporciona información de las propiedades del universo en el momento que se generó ($z = 1000$). En particular, la densidad de materia, de energía oscura, de materia oscura, etc.

En los momentos posteriores al *Bing Bang*, el universo estaba compuesto por fotones altamente energéticos, electrones libres y núcleos ionizados, lo que podemos ver como un mar de partículas que colisionan muy frecuentemente entre ellas, formando un plasma ionizado (Liddle, 2003). Esto se debe a las altas temperaturas del universo en esa época, que hacían que la energía típica de un fotón de la distribución fuera considerablemente mayor que la energía de ionización de los átomos de hidrógeno. Además, puesto que los fotones interactúan fuertemente con los electrones libres, el recorrido libre medio de cualquier fotón sería muy corto, y radiación y materia se encontrarían en equilibrio térmico debido a rápidas colisiones entre fotones y electrones libres, en un proceso conocido como *Compton Scattering* mediante el cual el electrón libre aniquila el fotón y lo vuelve a reemitir (Liddle, 2003).

Pero el universo estaba expandiéndose y, por lo tanto, enfriándose. Una vez alcanzada una cierta temperatura, inferior a las energías de enlace de los núcleos típicos, los fotones serán cada vez menos capaces de ionizar los átomos, por lo que los electrones empezarán a unirse a los núcleos, formando átomos neutros, en un proceso que llamamos recombinación (Peebles, 1968). Como consecuencia de ello los electrones se encuentran ligados a los núcleos, por lo que la dispersión Compton de los fotones no podrá tener lugar, y éstos comenzaron a viajar libremente por el espacio. Decimos entonces que la radiación se desacopla de la materia (Longair, 2008). A este momento se le conoce como desacoplamiento de los fotones. Después de esto, los fotones pueden seguir siendo dispersados por electrones, pero ahora por un proceso distinto, **dispersión Thomson** (Chen et al., 1998), cuya sección eficaz es mucho menor que en el caso de la dispersión Compton. De este modo, aunque continúa existiendo dispersión, radiación y materia ya no se encuentran en equilibrio térmico (Roos, 2003).

La superficie donde los últimos fotones fueron dispersados por electrones libres es conocida como **superficie de última dispersión** (last scattering surface) (Bolejko, 2011). Por tanto, los fotones que forman el CMB son aquellos que tuvieron su última interacción en dicha superficie.

El CMB es, entonces, el resultado de todos estos procesos, es decir, los fotones que existían en el momento del desacoplamiento continuaron propagándose libremente por el universo, aunque cada vez son más débiles y menos energéticos puesto que la expansión del universo hace que su longitud de onda aumente con el tiempo (y ésta es inversamente proporcional a su energía, de acuerdo con la relación de Planck) (Robitaille & Crothers, 2015). Consecuentemente, esta radiación ha ido disminuyendo su temperatura, hasta alcanzar el valor medido de (su valor actual), y continúa disminuyendo con la expansión del Universo (Fixsen, 2009).

Midiendo las propiedades de estos fotones (temperatura, polarización, etc.), podemos obtener información de la superficie de última dispersión y, por tanto, de cómo era el universo en aquella época (Roos, 2003).

Descubrimiento del CMB

El CMB fue descubierto accidentalmente en 1964 por los radioastrónomos *Arno Penzias y Robert Wilson* (Penzias & Wilson, 1965) y fue la culminación del trabajo iniciado en los años 1940 por *Ralph Alpher y Robert Herman*, que propusieron su existencia en el contexto de la teoría del Big Bang (Alpher & Herman, 2001). Por su descubrimiento, *Arno Penzias y Robert Wilson* recibieron el premio Nobel de Física en 1978, y significó el establecimiento casi definitivo del Big Bang como teoría del origen del universo, debido principalmente a que predice que la radiación de fondo cósmico de microondas debe tener un espectro de cuerpo negro, lo cual estaba de acuerdo con las observaciones realizadas (Wright, 2004).

Anisotropías del CMB

El modelo aceptado actualmente como modelo cosmológico estándar del universo, Λ CDM, ha sido establecido como consecuencia directa de las medidas obtenidas de las anisotropías de la temperatura del fondo cósmico de microondas (CMB) (Liddle, 2003). También son importantes los estudios de estructuras en grandes escalas del universo, la distribución y abundancia de cúmulos de galaxias y la nucleosíntesis de elementos en el universo primordial. Estas anisotropías en la temperatura del CMB son debidas a la existencia de fluctuaciones en la distribución de materia en la superficie de última dispersión. Estas fluctuaciones provendrían de una época anterior del universo y crecerían hasta llegar a convertirse en las estructuras a gran escala existentes en nuestra época (Hu & White, 1997). Este tipo de anisotropías, que llamaremos anisotropías primarias, son de origen primordial. Los mecanismos principales que producen este tipo de anisotropías son fluctuaciones intrínsecas, efecto Doppler y efecto Sachs-Wolfe (SW). Existen además otro tipo de anisotropías, llamadas anisotropías secundarias, que son debidas a otros procesos físicos que intervienen sobre los fotones del CMB en su trayectoria entre la superficie de última dispersión y el momento actual. Estas anisotropías secundarias pueden ser clasificadas, en función del fenómeno físico que interactúa con el CMB, en anisotropías secundarias gravitatorias (por ejemplo el efecto Sachs Wolfe Integrado) y anisotropías secundarias dispersivas (por ejemplo el efecto Sunyaev-Zel'dovich).

Polarización del CMB

En la época entre el desacoplamiento de los fotones y la recombinación electrón-protón, los fotones, que ahora viajan libremente, sufren, como ya se mencionó anteriormente, dispersión Thomson, lo cual produce la polarización parcial de la radiación. (Krauss et al., 2010). Esta polarización se descompone en dos modos (Kamionkowski et al., 1997):

- **Modos E**, de rotacional nulo, que son producidos por perturbaciones escalares en las anisotropías del CMB.
- **Modos B**, de gradiente nulo, producidos por perturbaciones tensoriales. Debido a que los modos B de polarización no pueden ser producidos por perturbaciones escalares su detección sería un indicio de la existencia de ondas gravitacionales primordiales (Krauss et al., 2010). Además, nos permitiría estudiar las perturbaciones tensoriales en el universo temprano y medir la escala de energía de la inflación (<http://francis.naukas.com/>).

El estudio de los modos de polarización nos proporciona una poderosa herramienta para estudiar los fenómenos ocurridos en épocas muy tempranas del universo (Krauss et al., 2010). Para el estudio de la inflación es necesario estudiar específicamente los modos B, los cuales, al ser solamente producidos por perturbaciones tensoriales, no introducen contaminación”.

1.2. QUIJOTE

El experimento QUIJOTE (Q-U-I-Joint Tenerife CMB Experiment), como se explica en Génova-Santos et al. (2015), es una colaboración científica internacional entre el Instituto de Astrofísica de Canarias, el Instituto de Física de Cantabria, el Departamento de Ingeniería de Comunicaciones (Santander), el Observatorio Jodrell Bank (Manchester, Reino Unido), el Cavendish Laboratory (Cambridge, Reino Unido), y la compañía IDOM (<http://www.iac.es/proyecto/cmb/pages/en/quijote-cmb-experiment.php>), se localiza en el observatorio del Teide (Tenerife, Islas Canarias), donde las condiciones atmosféricas son muy favorables para sus objetivos científicos.

El objetivo de QUIJOTE es la caracterización de la señal de modos B producida en la polarización del CMB por la época de la inflación, y la caracterización de la polarización de los contaminantes, galácticos y extragalácticos, en bajas frecuencias. Consta de dos telescopios, y tres instrumentos, los cuales realizan medidas de la polarización en el rango de las microondas, en frecuencias comprendidas entre 11 GHz y 42GHz, y en escalas angulares de 1° (Génova-Santos et al., 2015).



Figura 1.1: Experimento QUIJOTE, Observatorio del Teide, Tenerife ([http : //www.iac.es/proyecto/cmb/pages/en/quijote - cmb - experiment.php/](http://www.iac.es/proyecto/cmb/pages/en/quijote-cmb-experiment.php/))

Instrumentación

QUIJOTE está constituido por dos telescopios (QT1 y QT2). Cada uno de ellos cuenta con un sistema óptico tipo Gregorian Dragone sobre una montura altazimutal. Este sistema está formado por dos espejos, el primario de tipo parabólico y el secundario tipo hiperbólico, cuyas aperturas son 2.25 y 1.89 metros, respectivamente. La diferencia entre ambos es la frecuencia de operación, QT1 opera a frecuencias de hasta 90GHz, mientras QT2 está diseñado para alcanzar los 200 GHz (Génova-Santos et al., 2015).

Además de los dos telescopios, QUIJOTE consta de tres instrumentos ([http : //www.iac.es](http://www.iac.es)):

- **Instrumento MultiFrecuencia** (Multi-Frequency Instrument o MFI, por sus siglas en inglés): Formado por cuatro bocinas con receptores a 11, 13, 17 y 19 GHz., con ocho canales por bocina, haciendo que este instrumento disponga de 32 canales de recepción.
- **Instrumento de Treinta GHz** (Thirty-GHz Instrument o TGI, por sus siglas en inglés): Compuesto por 31 polarímetros, que trabajan en el rango de 26-36 GHz.
- **Instrumento de Cuarenta GHz** (Forty GHz Instrument o FGI, por sus siglas en inglés): Aún en fase de construcción, compuesto, al igual que el TGI, por 31 polarímetros, pero en este caso trabajando en torno a 40 GHz.

1.3. Contaminantes

Las medidas del CMB se ven afectadas por la presencia de contaminantes (Gawiser & Silk, 2000). Éstos pueden ser de dos tipos: Por un lado tenemos los contaminantes de tipo cosmológico, relacionados con las anisotropías del CMB (Génova-Santos, 2006), y por otro, los contaminantes de naturaleza no cosmológica: extragalácticos, galácticos y atmosféricos. Estos últimos serán los tratados a lo largo de este trabajo.

Contaminantes galácticos

Existen tres fuentes principales de contaminación de origen galáctico:

- **Radiación sincrotrón (synchrotron radiation)**

Una partícula cargada moviéndose en un campo magnético experimenta una fuerza de Lorentz que la acelera, causando la emisión de radiación (fotones) (Choudhuri, 1998). La radiación sincrotrón es producida cuando dicha aceleración es debida a campos magnéticos (magnetobremstrahlung) actuando sobre electrones ultrarelativistas. Ésta representa el principal mecanismo por el que se producen ondas de radio procedentes de fuentes astrofísicas (Urošević, 2014), y se puede encontrar en numerosos fenómenos tanto galácticos (magnetosfera de Júpiter, emisión del remanente de supernova de la Nebulosa del Cangrejo y emisión en radio de SNR IC443), como extragalácticos (emisión en radio de núcleos activos de galaxias, etc.) (Condon & Ransom, 2016). Este tipo de emisión domina en frecuencias < 10 GHz y su espectro de temperatura toma la forma $T \propto \nu^{-\beta}$ con $\beta \simeq 2.8 - 3.2$ (Génova-Santos, 2006).

- **Emisión libre-libre (free-free emission o bremsstrahlung)**

La emisión libre-libre es debida a campos de origen electromagnético que aceleran las partículas cargadas. En este caso, electrones libres son acelerados por campos eléctricos (bremsstrahlung) (Condon & Ransom, 2016). Los electrones libres son dispersados por iones (gas ionizado) sin ser capturados, es decir, permaneciendo libres después de la interacción (de ahí el término libre-libre) (Condon & Ransom, 2016). De los contaminantes galácticos mencionados éste será el más débil (Génova-Santos, 2006).

- **Emisión de polvo vibracional o polvo térmico (thermal dust)**

En astrofísica se denomina polvo a cualquier partícula sólida pequeña. La existencia de polvo galáctico interestelar afecta a las observaciones realizadas en un amplio rango de longitudes de onda. La partícula de polvo recibe energía a través de radiación de distintas longitudes de onda, por ejemplo radiación

UV, se calienta, y la re-emite en forma de espectro de cuerpo negro (Meisner & Finkbeiner, 2014). Esta emisión aumentará con la frecuencia, llegando a dominar sobre otros contaminantes a partir de frecuencias (Génova-Santos, 2006).

Una manera de reducir el efecto de los tres tipos de contaminación galáctica es observar en latitudes galácticas altas, es decir, en regiones alejadas del plano de la galaxia, donde la densidad de polvo será menor. Como ejemplo de estos tres tipos de contaminantes galácticos, podemos ver el espectro en radio e infrarrojo lejano de la galaxia M82 (Condon & Ransom, 2016), representados en la figura 1.2, donde se puede apreciar la contribución de los diferentes tipos de contaminantes galácticos.

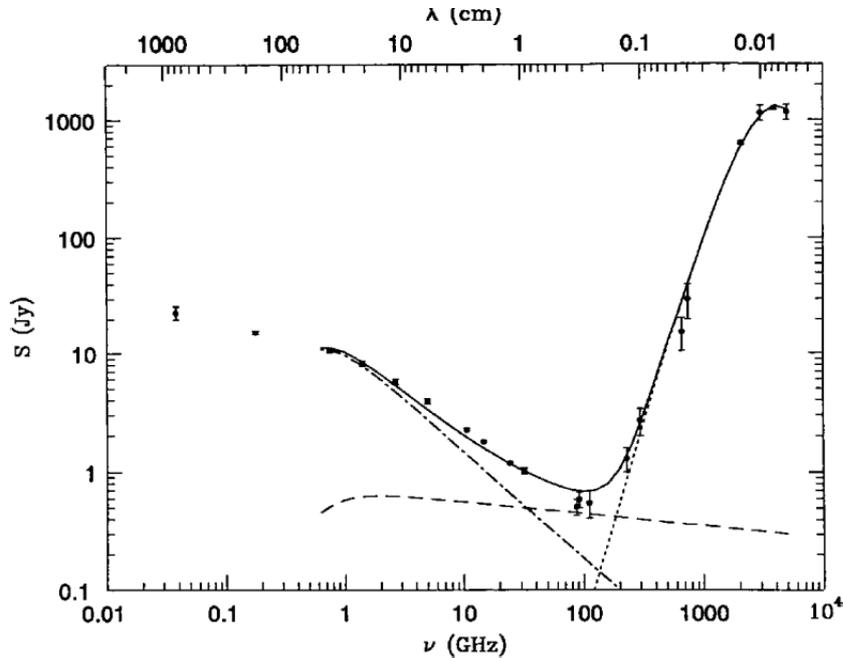


Figura 1.2: Ejemplo de un espectro en radio e infrarrojo lejano (M82), donde se pueden ver las diferentes contribuciones de los contaminantes galácticos: radiación sincrotrón (línea de puntos y rayas), que domina a frecuencias bajas, la emisión libre-libre (línea de rayas) y la emisión de polvo térmico (línea de puntos), que domina a frecuencias altas (Condon & Ransom, 2016).

■ Anomalous Microwave Emission (AME)

La emisión anómala de microondas (AME, por sus siglas en inglés), es una radiación desconocida procedente del medio interestelar (Kogut, 2012). Su intensidad se puede relacionar con la emisión de polvo térmico, aunque no completamente, pues ni este mecanismo, ni otros en este rango, como radiación sincrotrón o emisión libre-libre, pueden explicar el exceso de microondas observado a frecuencias de 20 a 40 GHz (Dickinson et al., 2011).

Contaminantes extragalácticos

Algunas de los contaminantes extragalácticos más importantes son (Gawiser & Silk, 2000):

- **Fuentes de radio extragalácticas:** galaxias elípticas, núcleos activos de galaxias (AGN), cuásares.
- **Fuentes infrarrojas extragalácticas:** starburst de galaxias a alto redshift.
- **Efecto Sunyaev-Zel'dovich** provocado por gases muy calientes en cúmulos de galaxias.

Estos contaminantes tienen una contribución muy importante en observaciones del CMB debido, en gran parte, a la falta de información acerca de, no solo la población de los objetos que los producen, sino de las características propias de los objetos (flujo, variabilidad temporal, etc.) (Génova-Santos, 2006).

Contaminantes atmosféricos

La emisión proveniente de la atmósfera aumenta con la frecuencia, lo que hace que las observaciones desde la superficie terrestre tengan que estar limitadas a frecuencias menores a unos 200 GHz (Génova-Santos, 2006), aunque, incluso a frecuencias menores que ésta, tenemos líneas de emisión de los componentes de la atmósfera que tendremos que evitar, como por ejemplo la del vapor de agua (Hammersley, 1998).

1.4. SNR IC443

IC433 (también conocido como la Nebulosa de la medusa o Jellyfish Nebula, en inglés) es un remanente de una supernova (SNR, en sus siglas en inglés) que ocurrió hace aproximadamente 30000 años en nuestra galaxia (Humensky & VERITAS Collaboration, 2015). Se encuentra situada cerca del **anticentro galáctico**, el cual se define como la dirección del espacio directamente opuesta a la dirección en que se encuentra el centro galáctico, visto por un observador desde La Tierra (Binney & Merrifield, 1998), a una distancia $\sim 1.5 pc$. Su diámetro es $\sim 0.75^\circ$ (que corresponden a, aproximadamente, $20 pc$) (Poveda & Woltjer, 1968). Este SNR ha sido ampliamente estudiado en un amplio rango de longitudes de onda y, recientemente, se ha establecido como una potente fuente de rayos gamma, tanto en GeV (Tavani et al., 2010; Abdo et al., 2010), como en TeV (Albert et al., 2007). Observaciones de SNR IC443 muestran una estructura filamentosa, tanto en el rango óptico como en la banda de radio (Castelletti et al., 2011), que varía tanto en brillo como en forma (Fesen & Kirshner, 1980). En la figura 1.3 (tomada en

el visible) podemos ver la estructura filamentosa en una fotografía de campo ancho, junto con otra que combina los rangos visible y rayos X tomada con el satélite Chandra (<http://chandra.harvard.edu>).

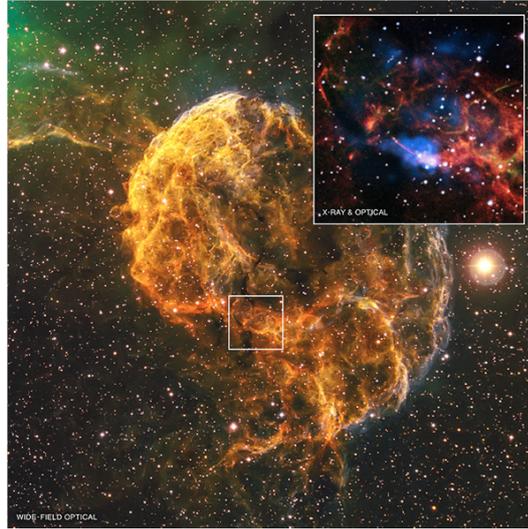


Figura 1.3: Supernova IC443: Imagen obtenida por *Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics* (<http://chandra.harvard.edu>)

Una de las propiedades de los remanentes de supernova, en particular de IC 443, y por la que nos interesa su estudio, es que actúan como aceleradores de electrones debido a la radiación sincrotrón, la cual abarca desde radio hasta rayos X (Humensky & VERITAS Collaboration, 2015; Koyama et al., 1995). Este SNR se puede observar en las nueve frecuencias en las que observa el telescopio espacial Planck (Planck Collaboration et al., 2016), diseñado para estudiar las anisotropías del CMB.

El modelo propuesto para la relación entre densidad de flujo y frecuencia se encuentra separado en tres regiones, en función de la frecuencia (Planck Collaboration et al., 2016):

- Un primer rango de frecuencias entre 1 y 100 GHz, donde el modelo sigue una ley de potencia simple (single power law).
- Un segundo rango a frecuencias mayores a 100 GHz, donde los valores de flujo hallados son probablemente debidos a la emisión de polvo térmico. En este rango de frecuencias también puede considerarse contaminación debida a la emisión del plano galáctico.

Según Planck Collaboration et al. (2016), la forma de la distribución espectral de energía (SED, por sus siglas en inglés) tanto en radio, como en microondas, puede aproximarse por una combinación de los modelos propuestos para la radiación sincrotrón y la emisión de polvo térmico. Haciendo un ajuste del SED, se puede ver lo siguiente:

- La radiación sincrotrón sigue una ley de potencia con índice espectral α , para frecuencias hasta 40 GHz. Entre 40 y 140 GHz disminuye.
- La emisión de polvo térmico tiene una temperatura y un índice espectral, que dependerá de la frecuencia, β . Esta componente será la dominante a partir de 140 GHz.

1.5. Justificación y objetivos

En las dos últimas décadas, el estudio de las anisotropías del **CMB**, primero en temperatura y más recientemente en polarización (Hu & White, 1997), se ha constituido como una de las herramientas más importantes para obtener información sobre el origen y la evolución de nuestro Universo. Ello ha conllevado el desarrollo de experimentos cada vez más avanzados tecnológicamente, entre los que se encuentra el experimento **QUIJOTE**. Además, es importante el estudio y la caracterización de los mecanismos de emisión galáctica que introducen contaminación sobre la radiación primordial, de los que ya se ha hablado en el capítulo 1. Además del estudio de la señal cosmológica, también es objetivo de QUIJOTE el estudio de estos mecanismos de emisión en nuestra galaxia.

A partir de datos en el rango de microondas provenientes de observaciones del experimento Quijote de **IC443**, en combinación con datos públicos en otras frecuencias (radio, FIR), procedentes de experimentos como **Planck**, **WMAP**, etc., se desarrollarán herramientas para calcular flujos, utilizando la técnica de fotometría de apertura (Laher et al., 2012).

Esta fuente ha sido elegida porque tenemos observaciones de QUIJOTE realizadas de tratarse de un objeto de interés científico, muy estudiado en la literatura y que puede ser estudiado como banco de pruebas para estudiar, en una fuente puntual, los mismos mecanismos de contaminación galáctica que queremos caracterizar en grandes escalas con QUIJOTE, con el fin de estudiar y corregir la contaminación que introducen sobre la señal de modos B.

La emisión de esta fuente a baja frecuencia se espera que esté dominada por la **radiación sincrotrón**, aunque hay algunos estudios que proponen que, dadas las características específicas de esta fuente, al ser un remanente de supernova muy evolucionado, también podría tener regiones termalizadas que podrían generar algo de **emisión libre-libre** (Onić et al., 2012).

Con los flujos obtenidos se construirá la distribución espectral de energía de la fuente, con la que se podrá estudiar la **radiación sincrotrón** y la **emisión de polvo térmico** provenientes de **IC443**, para, finalmente, ajustarla a un modelo que combina dos mecanismos de emisión: **sincrotrón** y **polvo térmico**.

Capítulo 2

Análisis de las observaciones

Abstract

The first step in the process of analyzing any source of data is to know the quantities we are using. In this chapter, we define the main quantities we use along this work, such as flux density, bright temperature, Planck Law, etc. It is also convenient to describe the surveys and telescopes where the data used in this work are taken, in this case they are from several telescopes like WMAP, Planck, etc. It is of special interest the maps coming from QUIJOTE, in radio frequencies, which allow us to analyze fluxes not only in intensity, but also in polarization. Finally, it is explained the methodology used to calculate these fluxes, and how they can be fitted to a two-component model. From this model, we obtain a set of parameters that will characterize each component, synchrotron radiation and thermal dust emission.

2.1. Definiciones: Flujo y Temperatura de brillo

En términos generales, la densidad de flujo es la potencia espectral (o por unidad de ancho de banda) y por unidad de superficie del detector, mientras que la intensidad es la potencia por unidad de ancho de banda, por unidad de superficie del detector y por unidad de ángulo sólido del emisor (Condon & Ransom, 2016; Rybicki & Lightman, 1979). Por lo tanto, la densidad de flujo será el resultado de integrar la intensidad en todo el ángulo sólido subtendido por el emisor (Burke & Graham-Smith, 2009).

■ Intensidad específica o brillo

Es la energía por unidad de tiempo, de frecuencia, de ángulo sólido del emisor y de superficie perpendicular a la dirección de propagación (Condon & Ransom, 2016).

$$I_\nu = \frac{dE}{dt dA \cos\theta d\Omega d\nu} \quad (2.1)$$

Con unidades en $W m^{-2} sr^{-2} Hz^{-1}$. En la figura 2.1 se muestra un esquema que define gráficamente esta definición.

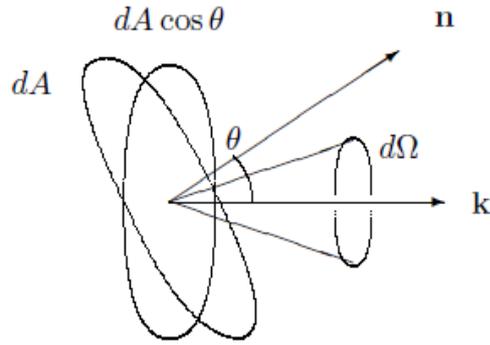


Figura 2.1: Energía dentro de un ángulo sólido $d\Omega$ que atraviesa un área dA , cuya normal \vec{n} forma un ángulo θ con la dirección \vec{k}

■ Densidad de flujo, S_ν

Es el flujo de energía por unidad de tiempo, de frecuencia y de superficie del detector y de superficie perpendicular a la dirección de propagación de la onda (Condon & Ransom, 2016). Es, por tanto, la intensidad específica integrada para todas las direcciones, teniendo en cuenta el ángulo entre la dirección de propagación de la onda, \vec{k} , y la normal a la superficie, \vec{n} .

$$S_\nu = \int_{4\pi} I_\nu \cos\theta d\Omega \quad (2.2)$$

En la práctica, cuando se calcula la densidad de flujo de una fuente pequeña, el dominio de integración es mucho menor de 4π , y se puede prescindir del factor $\cos\theta$ (Condon & Ransom, 2016).

$$S_\nu = \int_{fuente} I_\nu d\Omega \quad (2.3)$$

La unidad de densidad de flujo es el **Jansky (Jy)** (Burke & Graham-Smith, 2009), que se define como:

$$1 \text{ Jy} = 10^{-26} \text{ J s}^{-1} \text{ m}^{-2} \text{ Hz}^{-1}$$

- **Ley de Planck**

En equilibrio termodinámico, la radiación está en equilibrio con la materia y su intensidad viene dada por la ley de Planck para un cuerpo negro.

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/KT} - 1} \quad (2.4)$$

donde la temperatura será el único parámetro que describe el equilibrio termodinámico (Planck Collaboration et al., 2016).

- **Temperatura de brillo**

La radiación no está en equilibrio con la materia, por lo que la intensidad no va a venir dada directamente por la función de Planck. Sin embargo, se puede definir una temperatura para cada frecuencia, que se llamará temperatura de brillo, de modo que la intensidad a cada frecuencia tenga el valor dado por la ley de Planck a temperatura (Rybicki & Lightman, 1979).

$$I_\nu = B_\nu(T_B) \quad (2.5)$$

En general, T_B depende de la frecuencia, por lo que la radiación no vendrá dada por la ley de Planck.

En el límite de bajas frecuencias, es decir, cuando $h\nu \ll kT$, lo que se conoce como aproximación de Rayleigh-Jeans, se observa que (Burke & Graham-Smith, 2009).

$$B_\nu \simeq \frac{2h\nu^3}{c^2} T_B \quad (2.6)$$

Es decir, la intensidad es proporcional a la temperatura de brillo.

2.2. Descripción y formato de los datos

A baja frecuencia, para el estudio y ajuste de la radiación sincrotrón, se dispone de los siguientes mapas:

- Haslam et al. (1982) a 0.408 GHz.
- Berkhuijsen (1972) 0.820 GHz procedente del radio telescopio Dwingeloo.
- Reich & Reich (1986) a 1.42 GHz procedente del telescopio de 25 metros Stockert
- QUIJOTE, a 11, 13, 17 y 19 GHz.

- WMAP, a 22.69, 32.94, 40.62 y 60.2 GHz.
- Planck, a 28.40, 44.10 y 70.4 GHz.

De los tres primeros solo se dispone de mapas de intensidad, mientras que QUIJOTE, WMAP y Planck proporcionan mapas de I, Q y U. En el rango de frecuencias correspondientes a las microondas, para el estudio de la emisión de polvo térmico, serán usados los mapas:

- Planck, a frecuencias de 100, 143, 217, 353, 545 y 857 GHz, aunque solamente los tres primeros serán en intensidad y polarización, mientras el resto, correspondientes a las frecuencias mayores o iguales a 100 GHz, solamente de intensidad ([Planck Collaboration et al., 2016](#)).
- En el infrarrojo lejano, también para el estudio de la emisión de polvo térmico, se dispone de los mapas de Zodi- Subtracted Mission Average (ZSMA) COBE-DIRBE ([Hauser et al., 1998](#)) a frecuencias 1249.135, 2141.375, 2997.924 y 4996.541GHz. Es importante resaltar que Dirbe proporciona mapas a frecuencias mayores (10 canales en total), sin embargo, para este trabajo sólo se emplean medidas de las tres primeras.

2.3. Mapas tomados con QUIJOTE

Los mapas de QUIJOTE usados para realizar este estudio son adquiridos por el MFI, el cual proporciona 8 mapas de intensidad y polarización, como se pueden ver en la figura 2.2. Cada bocina observa a dos frecuencias distintas a la par, de tal modo que las bocinas 1 y 3 proporcionan mapas a 11 y 13 GHz, mientras que las bocinas 2 y 4 lo hacen a 17 y 19 GHz, respectivamente ([Génova-Santos et al., 2015](#)). Cada mapas aporta información de intensidad, I, y polarización, dada por los parámetros de Stokes Q y U. Las observaciones fueron realizadas entre octubre de 2014 y junio de 2015, haciendo un total de unas 200 horas de operación.

En base a una inspección visual, seleccioné aquellos con una calidad suficiente, es decir, que no mostraran estructuras anómalas en sus píxeles, serán utilizados para construir mapas de la fuente en cuatro frecuencias (11, 13, 17 y 19 GHz) mediante una pixelización HEALPIX ([Górski et al., 2005](#); [Génova-Santos et al., 2015](#)). El resultado final serán 24 mapas centrados en IC443, es decir, seis por frecuencia, donde se tendrán dos mapas por frecuencia para cada uno de los parámetros de Stokes I, Q, U.

Con el objetivo de tener una resolución de todos los mapas a un grado, se lleva a cabo un proceso de convolución de los mapas, igualando sus resoluciones independientemente del instrumento con el que hayan sido medidos. En la figura 2.4 se pueden ver ejemplos de estos mapas finales.

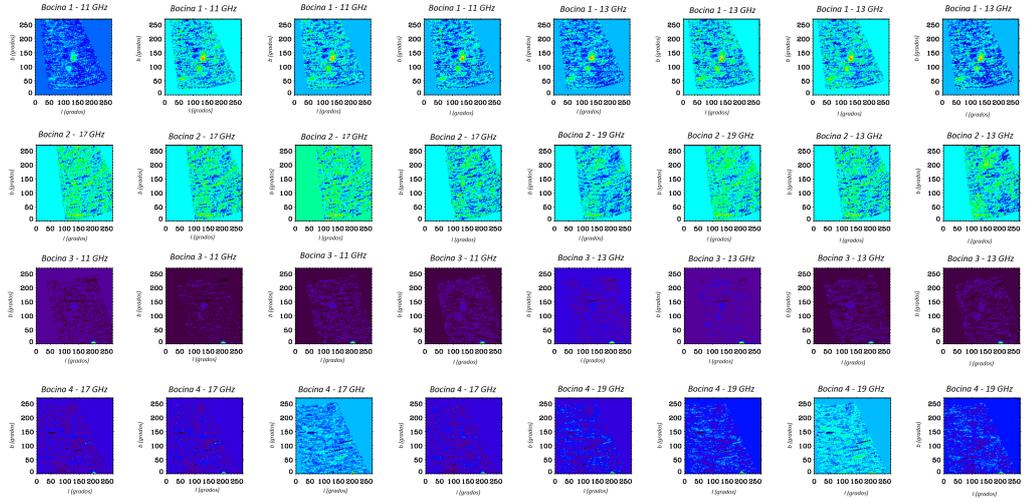


Figura 2.2: Ejemplo de algunos mapas empleados para el desarrollo de este trabajo tomados con QUIJOTE.

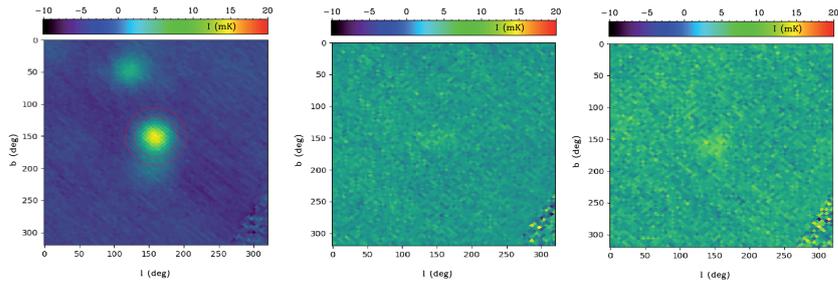


Figura 2.3: Mapas en I, Q y U, respectivamente, tomados por la bocina 1 QUIJOTE a 11 GHz. Se representa la técnica de fotometría de apertura empleada. El círculo de menor radio representa el radio de la apertura, y el anillo, el fondo.

2.4. Método para estimar el flujo

Los flujos de intensidad y de polarización se calculan usando fotometría de apertura (Génova-Santos et al., 2011; Dickinson et al., 2011; Génova-Santos et al., 2015). Se ha visto anteriormente que:

$$S_\nu = \int_{fuente} I_\nu d\Omega_\nu \quad (2.7)$$

Donde la intensidad queda definida mediante la expresión:

$$I_\nu = \frac{2k_B T_B}{\lambda^2} \quad (2.8)$$

Cuyas unidades son $W m^{-2} Hz^{-1} Sr^{-1}$

Sustituyendo las expresiones, se tiene que el flujo de la fuente queda descrito por la expresión:

$$S_\nu = \frac{2k_B}{\lambda^2} \int T_B d\Omega \quad (2.9)$$

Cuyas unidades son $Wm^{-2}Hz^{-1}$.

La ecuación 2.9 sólo puede ser empleada cuando se tenga información sobre la temperatura de brillo del objeto estudiado. En este caso, lo que se tiene es información en unidades de temperatura termodinámica, por lo que la ecuación 2.9 no es aplicable. En este caso, el flujo S_ν se calcula mediante la ecuación 2.10.

$$S_\nu = a(\nu)[\langle T_{ap} \rangle - \tilde{T}_{BG}] \quad (2.10)$$

Donde la función $a(\nu)$ es el factor de conversión de temperatura a densidad de flujo, el cual viene dado por:

$$a(\nu) = \frac{h^2 \nu^4}{2k_B T_{cmb}^2 c^2} \cdot \sinh^{-2} \left(\frac{h\nu}{2k_B T_{cmb}} \right) N_{ap} \Omega_{pix} \quad (2.11)$$

Donde:

- K_B es la constante de Boltzmann.
- λ es la longitud de onda.
- Ω_{pix} es el ángulo sólido subtendido por cada píxel. Dicho ángulo sólido es el mismo para cada píxel de la imagen, lo cual es una cualidad Healpix.
- N_{ap} es el número de píxeles de la apertura.
- $\langle T_{ap} \rangle$ es la temperatura media de los píxeles en el interior de la apertura.
- \tilde{T}_{BG} es la mediana de la temperatura de los píxeles pertenecientes al anillo exterior.
- $T_{cmb} = 2.725 K$ es la temperatura del CMB.

2.4.1. Cálculo del flujo en intensidad

Usando fotometría de apertura, se calcula el flujo sobre los mapas de intensidad mediante el siguiente procedimiento:

- Se crea una apertura de un tamaño determinado. En el caso del presente trabajo será de radio 60 arcmin, donde se suman los valores de la temperatura de brillo de cada uno de los píxeles, lo que se corresponde con una integración a toda la apertura.
- Se calcula el nivel de fondo en un anillo externo a la apertura, con radio interno 60 arcmin y radio externo 80 arcmin, hallando en el anillo la mediana de los píxeles del interior. Restando este valor del flujo obtenido en la apertura se obtiene el flujo de la fuente.

El flujo en intensidad, por tanto, será calculado mediante la expresión 2.10, como de detalla en Génova-Santos et al. (2015). La determinación del error asociado al flujo se hace mediante:

$$\sigma(S_\nu) = a(\nu) \cdot \sigma_{BG} \left[\frac{1}{N_{ap}} + \frac{\pi}{2} \frac{1}{N_{BG}} \right]^{1/2} \quad (2.12)$$

Donde σ_{BG} es la desviación estándar de las temperaturas de los píxeles del fondo. Se toma en el fondo y no en la apertura para evitar el aumento del error debido a la propia emisión de la fuente (Génova-Santos et al., 2015).

2.4.2. Cálculo del flujo en polarización

Ahora, usando los mapas de polarización Q y U, se lleva a cabo el mismo procedimiento para cada uno de los tipos de mapa. Posteriormente se calcula la polarización total de acuerdo con la siguiente expresión:

$$P = \sqrt{Q^2 + U^2} \quad (2.13)$$

Donde el error asociado se calcula mediante técnicas de propagación de errores. Es importante señalar que esta expresión para estimar el valor de la polarización P se ve afectada por un sesgo en casos de baja señal a ruido. En principio, se deben aplicar técnicas de corrección, las cuales no se realizarán en el presente trabajo.

2.4.3. Ajuste de la SED a un modelo de dos componentes

Se realiza un ajuste de dos componentes sobre los flujos obtenidos. Por un lado se ajusta la componente de radio, donde domina la radiación sincrotrón, mediante la expresión:

$$S_\nu^{sync} = A \cdot \nu^{-\beta_{sync}} \quad (2.14)$$

Donde ν es la frecuencia y β_{sync} es el índice espectral de la radiación sincrotrón.

Por otro lado, se ajusta la emisión de polvo térmico, que domina en frecuencias en el infrarrojo lejano, para lo cual se hará (Génova-Santos et al., 2015):

$$S_{\nu}^{dust} = \tau_{250} \cdot \left(\frac{\nu}{1200}\right)^{\beta_d} \cdot B_{\nu}(T_d) \quad (2.15)$$

Donde:

- ν es la frecuencia.
- β_d es el índice espectral de la emisión de polvo térmico.
- τ_{250} es la profundidad óptica a $250\mu m$.
- $B_{\nu}(T_d)$ es la ley de Planck en aproximación de Rayleigh-Jeans (ecuación 2.6).

Con lo cual se obtendrán dos curvas ajustadas a las contribuciones de los contaminantes considerados, cada uno en las frecuencias donde éste domina.

Para un mejor ajuste de la SED, se debería tener en cuenta la contribución de la emisión libre-libre a frecuencias intermedias, aunque dicha emisión no ha sido modelada en el presente trabajo.

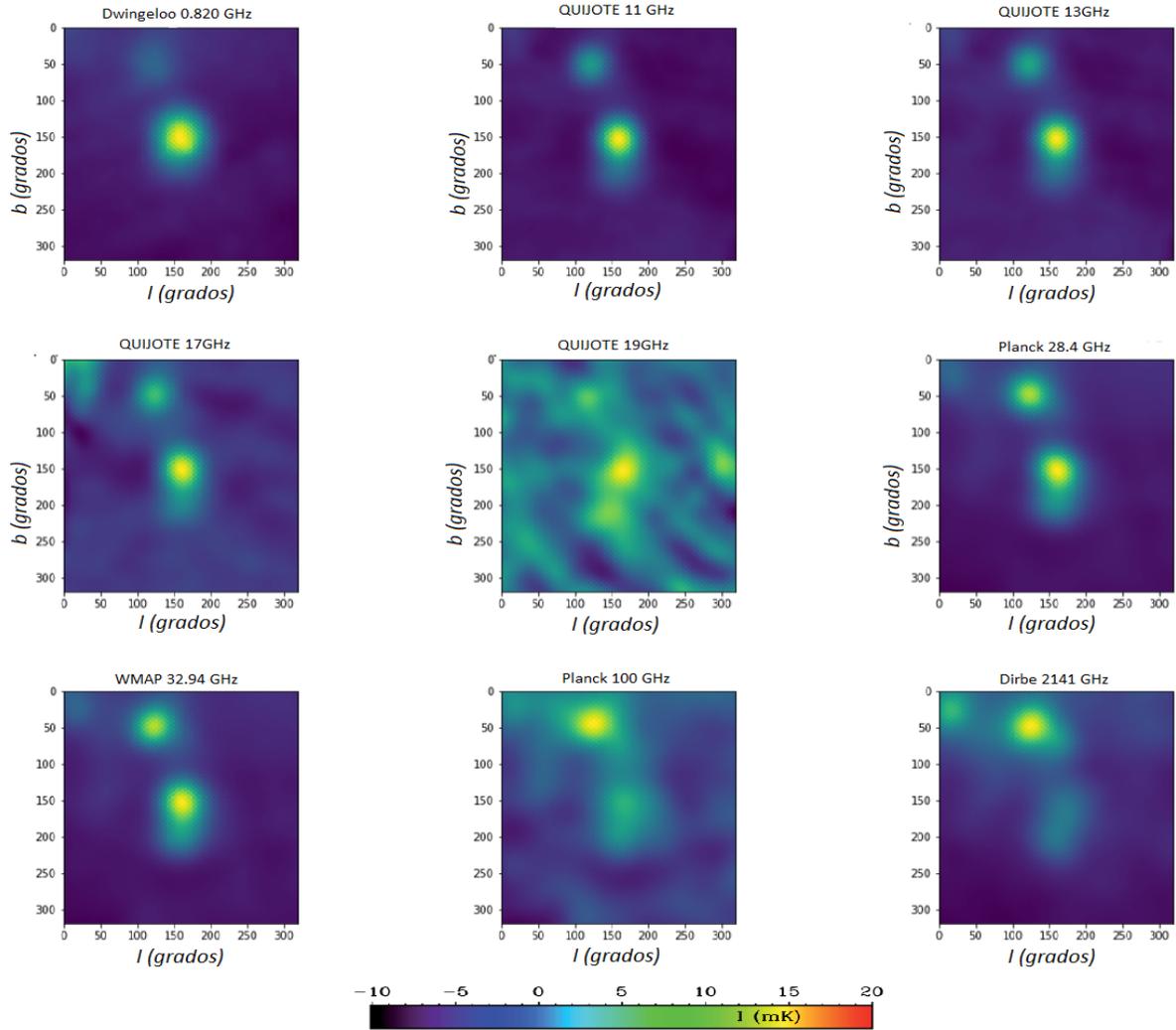


Figura 2.4: Representación en intensidad de mapas tomados con diferentes instrumentos del remanente IC443 empleadas en el análisis realizado a diferentes frecuencias. Las imágenes de QUIJOTE corresponden a diferentes bocinas.

Capítulo 3

Resultados y discusión

Abstract

The main goal in this chapter is to analyze and discuss the results we obtain from the study of the maps of IC443 in radio frequencies and FIR, where we want to characterize the galactic foregrounds that exist at this range: synchrotron radiation and thermal dust emission. This analysis will be made in two different parts. The first one will include intensity and polarization of synchrotron radiation at low frequencies, and intensity of thermal dust at higher frequencies. In the second one we will mix the three parts altogether, using a two-component model, in order to see the full SED of the object.

3.1. Intensidad de la radiación sincrotrón

En el rango de frecuencias hasta aproximadamente 100 GHz, donde domina la radiación sincrotrón, se dispone de los mapas de frecuencia: **Haslam, Dwingeloo, Reich, QUIJOTE, WMAP y Planck**.

De los datos extraídos de los mapas y mediante la técnica de fotometría de apertura se obtiene el flujo de la fuente en cada una de las frecuencias consideradas, que puede ser vista en la tabla 3.1.

Estos valores no pueden ser sometidos a comparación, puesto que los valores típicos para el flujo de un SNR dependen de varios factores, principalmente de la intensidad del campo magnético, de la densidad de electrones y de la distancia a la que se encuentre el objeto (Kogut, 2012).

Por este motivo, resulta más importante calcular el índice espectral mediante un ajuste de la intensidad de la radiación en base a una ley de potencias, donde el flujo es calculado a partir de la ecuación 3.1, tal y como se ha especificado en el capítulo 2.

Survey]	ν [GHz]	Flujo [Jy]
Haslam	0.408	191,455±2,037
Dwingeloo	0.82	92,839±17,310
Reich	1.42	87,633±21,552
QUIJOTE	11.0	50,078±1,365
QUIJOTE	11.0	50,887±2,313
QUIJOTE	13.0	48,809±2,552
QUIJOTE	13.0	50,186±4,342
QUIJOTE	17.0	38,364±8,907
QUIJOTE	17.0	33,355±5,120
QUIJOTE	19.0	38,046±10,803
QUIJOTE	19.0	29,690±4,738
WMAP	22.69	37,881±11,0143
Planck	28.4	33,953±2,945
WMAP	32.94	32,898±5,372
WMAP	40.62	29,645±1,302
Planck	44.1	28,012±1,786
WMAP	60.2	24,907±3,294
Planck	70.4	23,616±4,428

Tabla 3.1: Valores para el flujo en intensidad con sus errores correspondientes para la componente de radiación sincrotrón.

$$S_{\nu}^{sync} = A \cdot \nu^{-\beta_{sync}} \quad (3.1)$$

El cual se compara con el valor típico para un remanente de supernova, que depende principalmente de la distribución de energías de los electrones, estando comprendida en el rango entre 0.4 y 1.3 (Kogut, 2012).

En la figura 3.1 se muestra el ajuste realizado en el rango de frecuencias correspondiente.

El valor obtenido para el índice espectral es , que entra dentro de los valores esperados teóricamente para un SNR. Se ha de tener en cuenta que en este modelo no se está teniendo en cuenta la emisión libre-libre, la cual, aunque no sea dominante, tiene influencia a frecuencias intermedias. Por esto, el índice obtenido está sesgado con respecto al índice espectral real de la radiación sincrotrón, es decir, la pendiente del ajuste es en realidad mayor que la obtenida.

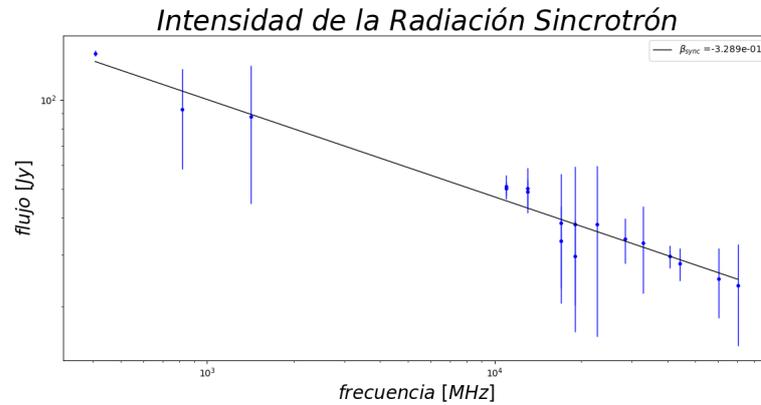


Figura 3.1: Representación y ajuste de los datos obtenidos para la componente de radiación sincrotrón emitida por IC443.

3.2. Intensidad de la emisión de polvo térmico

A frecuencias más altas, entre 92,99 y 4996 GHz, los datos utilizados proceden del satélite Planck, WMAP y Dirbe. Se calcula el flujo a frecuencias correspondientes a la emisión de polvo térmico siguiendo el mismo procedimiento que en el caso anterior, donde se obtienen los valores que se muestran en la tabla 3.2.

Survey	ν [GHz]	Flujo [Jy]
WMAP	92.99	25,135±7,0549
Planck	100.0	26,891±7,400
Planck	143.0	37,462±6,281
Planck	217.0	123,597±43,880
Planck	353.0	533,462±3,577
Planck	545.0	1802,077±4,070
Planck	857.0	5170,237±1,504
Dirbe	1249.0	10124,376±0,845
Dirbe	2141.0	14971,281±0,738
Dirbe	2997.0	8108,647±1,656

Tabla 3.2: Valores para el flujo en intensidad con sus errores correspondientes para la componente de polvo térmico.

Con estos resultados se ha realizado un ajuste siguiendo el modelo descrito en el capítulo 2, mediante

la ecuación 2.15, a partir del cual se obtienen los parámetros τ_{250} , β_d y T_d necesarios para caracterizar la emisión por polvo térmico. Dicho ajuste se puede ver en la figura 3.2.

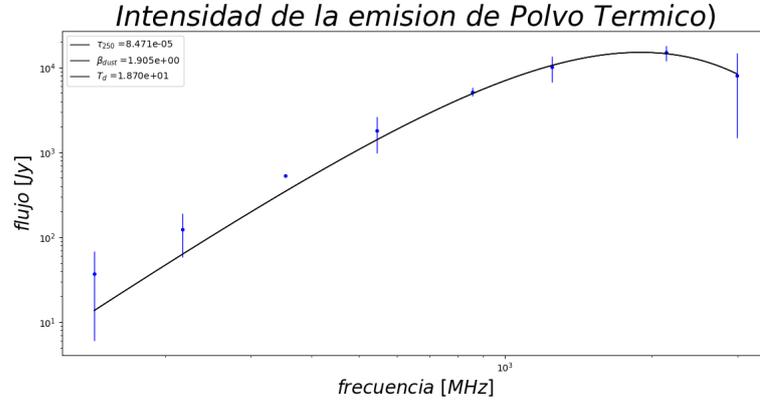


Figura 3.2: Representación y ajuste de los datos obtenidos para la componente de radiación por polvo térmico emitida por IC443.

Se encuentran los siguientes valores de los parámetros del ajuste:

$$\tau_{250} = 9.5 \cdot 10^{-5} \quad \beta_d = 1.90 \quad T_d = 18.7 \text{ K}$$

A través de algunos estudios podemos saber los valores típicos que toman los parámetros que describen la emisión de polvo térmico del ajuste son: $\tau_{250} \sim 10^{-3} - 10^{-4}$, $T_d \sim 20 \text{ K}$ y un valor del índice espectral con valores entre 0 y 2 (Planck Collaboration et al., 2016). Otros estudios, usando un modelo de dos componentes, encuentran un valor más preciso del índice espectral: $\beta_d = 1.5$ (Saken et al., 1992). Se ha de tener en cuenta también, que los valores de τ_{250} y T_d suelen estar degenerados, por lo que el ajuste simultáneo de los dos parámetros suele ser complicado. Comparando nuestro resultado con los estudios ya mencionados, se puede observar que los valores obtenidos con nuestro ajuste se encuentran dentro de los valores esperados de acuerdo con los estudios realizados por Blain et al., 2002 y Planck Collaboration et al. (2016). Así mismo, se observa que el valor del índice espectral se encuentra próximo al propuesto por Saken et al. (1992) como valor más preciso para este parámetro. Con ello, se puede concluir que este ajuste nos permite obtener valores representativos para los parámetros característicos de la emisión de polvo térmico, pudiendo así caracterizar la fuente de acuerdo con dicha emisión.

3.3. Polarización de la radiación sincrotrón

Los mapas de QUIJOTE, WMAP Y Planck a frecuencias menores a 100 GHz proporcionan también información de la polarización en Q y U. Los mapas de Planck a frecuencias entre 100 y 353 GHz tienen también información sobre la polarización, aunque en el presente trabajo no se han tratado, pues estas frecuencias están dominadas por la emisión polarizada del polvo térmico.

Con estos datos, se puede calcular la polarización de la fuente a frecuencias donde se espera que sea significativa, aunque pequeña. Se calculará el flujo en Q y en U siguiendo el mismo método que para la intensidad, y se halla la polarización por medio de la ecuación 2.13. Los resultados obtenidos se muestran en la tabla 3.3.

Survey	ν GHz	Q [Jy]	U [Jy]	P [Jy]	P/I [%]
QUIJOTE	11	0.410±0.0489	1.765±0.054	1.812±0.223	3.619±0.642
QUIJOTE	11	0.513±0.0676	0.768±0.162	0.924±0.231	1.816±0.618
QUIJOTE	13	0.604±0.0902	0.626±0.143	0.870±0.240	1.782±0.674
QUIJOTE	13	0.874±0.0093	0.998±0.034	1.33±0.048	2.645±0.553
QUIJOTE	17	0.0541±0.0199	0.808±0.001	0.811±0.299	2.113±1.759
QUIJOTE	17	0.146±0.028	-0.237±0.029	0.279±0.065	0.836±0.452
QUIJOTE	19	2.419±0.232	-3.245±0.133	4.049±0.423	10.641±7.155
QUIJOTE	19	-1.401±0.018	0.037±0.009	1.402±0.352	4.721±2.691
WMAP	22.69	0.289±0.046	0.751±0.111	0.805±0.177	2.125±1.703
Planck	28.40	0.471±0.009	0.439±0.114	0.644±0.168	1.897±0.824
WMAP	32.94	0.299±0.0137	0.378±0.150	0.482±0.193	1.466±1.065
WMAP	40.62	0.194±0.016	0.528±0.214	0.563±0.234	1.900±0.955
Planck	44.10	0.453±0.001	0.503±0.098	0.678±0.133	2.420±0.784
WMAP	60.20	0.374±0.217	0.164±0.012	0.409±0.240	1.641±1.396
Planck	70.40	-0.007±0.004	0.969±0.008	0.969±0.530	4.103±3.781

Tabla 3.3: Valores para el flujo en polarización con sus errores correspondientes para la componente de radiación sincrotrón.

En la figura 3.3 se muestran los valores de flujo contenidos en la tabla 3, así como el ajuste llevado a cabo para los datos de polarización.

La radiación sincrotrón puede estar muy polarizada, con un nivel de polarización que puede llegar a ser de hasta el 75 % del valor total de la intensidad. Este porcentaje depende de varios factores, entre ellos el índice espectral (Hu & White, 1997). En este caso, el valor de la polarización a 1 GHz representa el $3.34 \pm 1.89\%$ del valor de la intensidad total hallada para esta fuente. Además, del ajuste obtenemos un índice espectral de $\beta_{pol} = -0.3617$, por el cual sabemos que la amplitud de la polarización disminuye con la frecuencia, como se espera que ocurra en la polarización de la radiación sincrotrón, hasta alcanzar un mínimo a frecuencias en torno a 100 GHz (Hu & White, 1997).

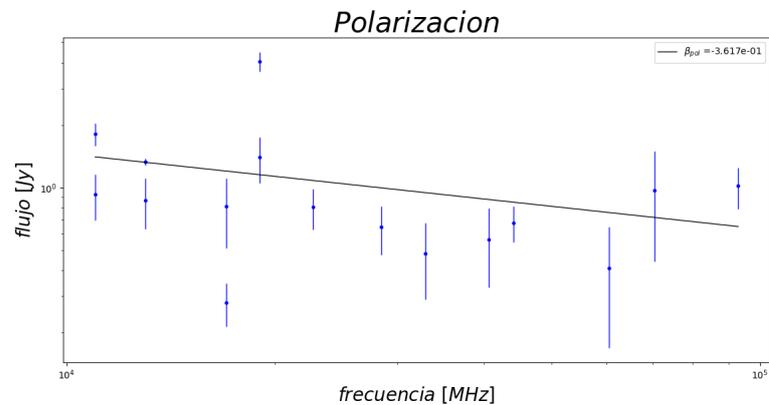


Figura 3.3: Representación y ajuste de los datos obtenidos para la componente de polarización emitida por IC443.

3.4. Distribución espectral de energía

Se han visto hasta ahora los datos, representación y ajuste de la intensidad de la radiación sincrotrón y de polvo térmico por separado. A continuación, se realiza un ajuste a un modelo de dos componentes, es decir, se ajusta a un modelo que compuesto por los dos anteriores y se aplica a todo el rango de frecuencias estudiado, de modo que los dos contaminantes se ven modelizados por una sola ecuación.

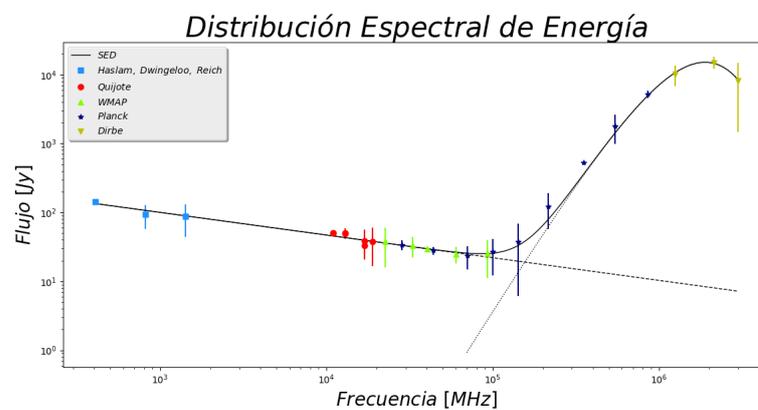


Figura 3.4: Ajuste de la distribución espectral de energía en medida de intensidad para la radiación emitida por IC443. Se muestra el ajuste a un modelo de dos componentes, donde la línea discontinua corresponde al ajuste de la componente de radiación sincrotrón mientras que la línea de puntos hace referencia al ajuste del modelo para la componente de polvo térmico.

En la figura se puede apreciar que los puntos de Planck a frecuencias altas se encuentran por encima del modelo, esto se debe a que los valores obtenidos de DIRBE están sesgando el ajuste. Finalmente, para poder comparar todo el modelo de forma conjunta, se muestran en la misma figura el ajuste a un modelo de dos componentes de la intensidad y el ajuste de la polarización.

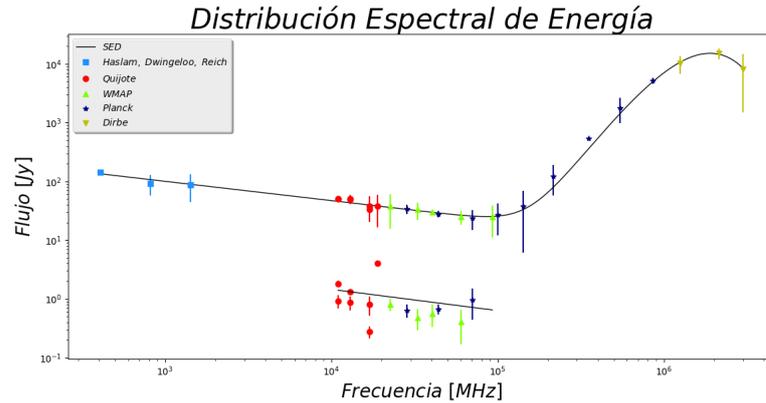


Figura 3.5: Ajuste a la SED así como a la componente de polarización de la luz emitida por el remanente de supernova IC443.

En esta última gráfica se puede apreciar el bajo nivel de polarización que tiene nuestra fuente con respecto a la intensidad total de la radiación sincrotrón, así como la caída de la amplitud de la polarización con la frecuencia, como ya se ha comentado para la figura 3.3.

Capítulo 4

Conclusiones y líneas futuras de investigación

Abstract

The results we obtain in this report are close to the typical values of SNRs, especially in thermal dust frequencies. The fact that we did not study free-free emission causes slight discrepancies in the spectral index of synchrotron radiation and the shape of the two-component fit model. But they are not too big, and the general purpose of characterize the spectral emission distribution of IC443 is fulfilled with the study of synchrotron radiation and thermal dust emission.

4.1. Conclusiones y líneas futuras de investigación

En este trabajo se ha caracterizado dos de los principales contaminantes a bajas frecuencias, la radiación sincrotrón y el polvo térmico. El objeto de este estudio es el remanente de supernova IC443, para lo cual se han utilizado varias fuentes de datos, entre ellas observaciones realizadas por QUIJOTE. Para el estudio se ha considerado en primer lugar el ajuste de cada componente por separado. A bajas frecuencias, a frecuencias de radiación sincrotrón se obtiene un buen ajuste a los datos, con valores del índice espectral un poco por debajo del valor típico para un SNR, sin embargo, dado que no se ha tenido en cuenta la contribución de la emisión libre-libre, el valor del índice espectral si se ajusta a lo esperado.

A frecuencias más altas, en el rango donde domina el polvo térmico, el modelo utilizado para esta componente proporciona también un buen ajuste a los datos. También los valores de los parámetros del ajuste, τ , se encuentran dentro del valor típico de este tipo de objetos. En este caso, el no haber incluido

la contribución libre-libre no afecta al resultado, pues esta tiene una contribución menor a frecuencias mayores.

A continuación, se estudió la amplitud de la polarización a bajas frecuencias, en el rango donde domina la radiación sincrotrón. Como era de esperar, se obtienen valores muy bajos en comparación con el flujo de intensidad, lo cual es consistente con la contribución de la radiación sincrotrón. El índice espectral obtenido está también en el rango de los valores que se deberían obtener. Finalmente, se obtiene la distribución espectral de energía en todo el rango de frecuencias, ajustándola mediante un modelo de dos componentes, combinación de radiación sincrotrón y emisión de polvo térmico. A altas y bajas frecuencias, este modelo se ajusta bien los datos de cada uno de los contaminantes representados. Sin embargo, a frecuencias intermedias existe una ligera discrepancia entre el modelo y los datos, que es debida a la contribución de la emisión libre-libre, la cual domina en este rango de frecuencias, y que no ha sido considerada en este trabajo.

Se puede ver que, en general, los resultados son buenos y consistentes con los valores que debe tener un objeto de este tipo. Sin embargo, este estudio podría ser mejorado, de forma que se ajuste más a los valores reales incluyendo la emisión libre-libre, lo cual mejoraría no solo el valor obtenido para el índice espectral de la intensidad de la radiación sincrotrón, sino también la forma de los ajustes realizados.

Referencias

- Abdo, A. A., Ackermann, M., Ajello, M., et al. 2010, ApJ, 712, 459
- Albert, J., Aliu, E., Anderhub, H., et al. 2007, ApJ, 664, L87
- Alpher, R. A., & Herman, R. 2001, Genesis of the big bang / Ralph A. Alpher, Robert Herman Oxford, UK: Oxford University Press. ISBN 0-19-511182-6, 2001, VIII + 214 pp.,
- Bennett, C. L., Larson, D., Weiland, J. L., et al. 2013, ApJS, 208, 20
- Berkhuijsen, E. M. 1972, A&AS, 5, 263
- Binney, J., & Merrifield, M. 1998, Galactic astronomy / James Binney and Michael Merrifield. Princeton, NJ : Princeton University Press, 1998. (Princeton series in astrophysics) QB857 .B522 1998
- Bolejko, K. 2011, J. Cosmology Astropart. Phys., 2, 025
- Burke, B. F., & Graham-Smith, F. 2009, Infrared Astronomy,
- Castelletti, G., Dubner, G., Clarke, T., & Kassim, N. E. 2011, A&A, 534, A21
- Chen, S.-Y., Maksimchuk, A., & Umstadter, D. 1998, Nature, 396, 653
- Choudhuri, A. R. 1998, Philosophy and Foundations of Physics,
- Condon, J. J., & Ransom, S. M. 2016, Essential Radio Astronomy, by James J. Condon and Scott M. Ransom. ISBN: 978-0-691-13779-7. Princeton, NJ: Princeton University Press, 2016.,
- Dickinson, C., Peel, M., & Vidal, M. 2011, MNRAS, 418, L35
- Fesen, R. A., & Kirshner, R. P. 1980, ApJ, 242, 1023
- Fixsen, D. J. 2009, ApJ, 707, 916
- Gawiser, E., & Silk, J. 2000, Phys. Rep., 333, 245

- Génova-Santos, R. T., Anisotropías primarias y secundarias del fondo cósmico de microondas: parámetros cosmológicos y la distribución de bariones
- Génova-Santos, R., Rebolo, R., Rubiño-Martín, J. A., López-Caraballo, C. H., & Hildebrandt, S. R. 2011, *ApJ*, 743, 67
- Génova-Santos, R., Rubiño-Martín, J. A., Rebolo, R., et al. 2015, *Highlights of Spanish Astrophysics VIII*, 207
- Génova-Santos, R., Rubiño-Martín, J. A., Rebolo, R., et al. 2015, *MNRAS*, 452, 4169
- Górski, K. M., Hivon, E., Banday, A. J., et al. 2005, *ApJ*, 622, 759
- Hammersley, P. L. 1998, *New A Rev.*, 42, 533
- Haslam, C. G. T., Salter, C. J., Stoffel, H., & Wilson, W. E. 1982, *A&AS*, 47, 1
- Hauser, M. G., Arendt, R. G., Kelsall, T., et al. 1998, *ApJ*, 508, 25
- Hu, W., & White, M. 1997, *New A*, 2, 323
- Humensky, B., & VERITAS Collaboration 2015, 34th International Cosmic Ray Conference (ICRC2015), 34, 875
- Kamionkowski, M., Kosowsky, A., & Stebbins, A. 1997, *Physical Review Letters*, 78, 2058
- Kogut, A. 2012, *ApJ*, 753, 110
- Koyama, K., Petre, R., Gotthelf, E. V., et al. 1995, *Nature*, 378, 255
- Krauss, L. M., Dodelson, S., & Meyer, S. 2010, *Science*, 328, 989
- Laher, R. R., Gorjian, V., Rebull, L. M., et al. 2012, *PASP*, 124, 737
- Lasenby, A. 2009, *Space Sci. Rev.*, 148, 329
- Liddle, A. 2003, *An Introduction to Modern Cosmology, Second Edition*, by Andrew Liddle, pp. 188. ISBN 0-470-84834-0. Wiley-VCH, May 2003., 188
- Longair, M. S. 2008, *Galaxy Formation*, by Malcolm S. Longair Berlin: Springer, 2008. ISBN 978-3-540-73477-2,
- Meisner, A. M., & Finkbeiner, D. P. 2014, *American Astronomical Society Meeting Abstracts #224*, 224, 220.14

- Onić, D., Urošević, D., Arbutina, B., & Leahy, D. 2012, *ApJ*, 756, 61
- Peebles, P. J. E. 1968, *ApJ*, 153, 1
- Penzias, A. A., & Wilson, R. W. 1965, *ApJ*, 142, 419
- Planck Collaboration, Arnaud, M., Ashdown, M., et al. 2016, *A&A*, 586, A134
- Poveda, A., & Woltjer, L. 1968, *AJ*, 73, 65
- Reich, P., & Reich, W. 1986, *A&AS*, 63, 205
- Robitaille, P.-M., & Crothers, S. J. 2015, *Progress in Physics*, 11, 120
- Roos, M. 2003, *Introduction to Cosmology, Third Edition*, by Matts Roos, pp. 294. ISBN 0-470-84910-X. Wiley-VCH , December 2003., 294
- Saken, J. M., Fesen, R. A., & Shull, J. M. 1992, *ApJS*, 81, 715
- Rybicki, G. B., & Lightman, A. P. 1979, *New York, Wiley-Interscience*, 1979. 393 p.,
- Tavani, M., Giuliani, A., Chen, A. W., et al. 2010, *ApJ*, 710, L151
- Urošević, D. 2014, *Ap&SS*, 354, 541
- Wood, C. A., Mufson, S. L., & Dickel, J. R. 1991, *AJ*, 102, 224
- Wright, E. L. 2004, *Measuring and Modeling the Universe*, 291